खंड १, अंक १, जनवरी–२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 1, Issue 1, January-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

आमंत्रित आलेख (INVITED ARTICLE)

DOI: 10.66346/ev.v1i1.2026.9

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण: सतत ऊर्जा के लिए सूर्य प्रकाश का उपयोग

विनय कु. मिश्र, कंचन शर्मा, राजेश कु. यादव*
रसायन विज्ञान और पर्यावरण विज्ञान विभाग, मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय, गोरखपुर, उत्तर प्रदेश, भारत-273010
लेखक से संवाद के लिए ईमेल*- rajeshkr_yadav2003@yahoo.co.in

आलेख प्राप्त: १० फरवरी २०२६; अंतिम संशोधन: २१ मार्च २०२६; स्वीकृत: २१ मार्च २०२६
प्रथम ऑनलाइन प्रकाशित: २१ मार्च २०२६

सारांश

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण से प्रेरित एक उभरती हुई वैज्ञानिक तकनीक है, जिसका उद्देश्य सूर्य ऊर्जा को स्वच्छ और सतत रासायनिक ईंधनों में परिवर्तित करना है। सूर्य प्रकाश, जल और कार्बन डाइऑक्साइड का उपयोग करते हुए कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियाँ हाइड्रोजन तथा अन्य कार्बन-आधारित ऊर्जा वाहकों का उत्पादन करने का प्रयास करती हैं, जो जीवाश्म ईंधनों पर आधारित ऊर्जा प्रणालियों का एक प्रभावी विकल्प प्रदान करती हैं। यह आलेख कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण के मूल सिद्धांतों, प्रमुख घटकों और इसके महत्वपूर्ण अनुप्रयोगों-जैसे सौर जल-विभाजन और कार्बन डाइऑक्साइड अपचयन-को सरल एवं शैक्षणिक भाषा में प्रस्तुत करता है। साथ ही, पदार्थ विज्ञान, उत्प्रेरण और प्रणाली अभिकल्पना में हुई हालिया प्रगति, पर्यावरणीय एवं सामाजिक महत्व तथा इस क्षेत्र से जुड़ी प्रमुख चुनौतियों पर भी चर्चा की गई है। समग्र रूप से यह अध्याय दर्शाता है कि कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण सतत ऊर्जा उत्पादन की दिशा में एक आशाजनक तकनीक है और निम्न-कार्बन भविष्य की ओर अग्रसर होने में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकती है। दूसरे शब्दों में, फोटोउत्प्रेरक–एंज़ाइम से जुड़ी प्रणाली कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की एक बहुत ही प्रभावी विधि है, जिसमें सूर्य के प्रकाश का उपयोग करके उपयोगी रसायन या ईंधन बनाए जाते हैं। इस अध्ययन में हमने एक नया ग्रैफीन-आधारित फोटोउत्प्रेरक तैयार किया है, जो दृश्यमान प्रकाश में सक्रिय रहता है। इसमें बहु-एंथ्राक्विनोन युक्त पोर्फिरिन जैसे प्रकाश अवशोषक अणु को रासायनिक रूप से संशोधित ग्रैफीन से स्थायी रूप से जोड़ा गया है। यह फोटोउत्प्रेरक CO_2 गैस से फॉर्मिक अम्ल के कुशल उत्पादन में सहायक होता है। हमारे परिणाम यह दिखाते हैं कि ग्रैफीन-आधारित पदार्थ कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण में प्रभावी फोटोउत्प्रेरक के रूप में काम कर सकते हैं। साथ ही, यह प्रणाली CO_2 से सीधे सौर रसायन या सौर ईंधन को चयनात्मक रूप से बनाने का एक उत्कृष्ट उदाहरण भी प्रस्तुत करती है।

सूचक शब्द - कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण, रासायनिक ईंधनों में परिवर्तित करना, CO_2 गैस से फॉर्मिक अम्ल

खंड १, अंक १, जनवरी–२०२६
ई–विज्ञानम
मासिक विज्ञान पत्रिका

Vol. 1, Issue 1, January-2026
e-vigyanam
Monthly Science Journal

आमंत्रित आलेख (INVITED ARTICLE)

DOI: 10.66346/ev.v1i1.2026.9

Artificial Photosynthesis: Harnessing Sunlight for Sustainable Energy

Vinay K. Mishra, Kanchan Sharma, Rajesh K. Yadav*
Department of Chemistry and Environmental Science, Madan Mohan Malaviya University of Technology, Gorakhpur, U.P., India-273010
Corresponding Author Email*- rajeshkr_yadav2003@yahoo.co.in

Received on: 10 February 2026; Final Revision: 21 March 2026; Accepted: 21 March 2026
Published Online First on: 21 March 2026

ABSTRACT

Artificial photosynthesis is an emerging scientific approach inspired by natural photosynthesis, aimed at converting solar energy into clean and sustainable chemical fuels. By utilizing sunlight, water, and carbon dioxide, artificial photosynthetic systems seek to produce fuels such as hydrogen and carbon-based energy carriers, offering an alternative to fossil-fuel-dependent energy technologies. This essay presents a comprehensive and student-friendly overview of artificial photosynthesis, discussing its fundamental principles, key components, and major applications, including solar water splitting and carbon dioxide reduction. Recent advances in materials science, catalysis, and system design are highlighted, along with the environmental and societal relevance of this technology. The chapter also addresses existing challenges related to efficiency, stability, cost, and large-scale implementation. Overall, the discussion emphasizes the potential of artificial photosynthesis to contribute to sustainable energy production and to play a significant role in the transition toward a low-carbon future.

Keywords: Artificial light transport, conversion into chemical fuels, formic acid from CO_2 gas

लेखक परिचय
विनय कुमार मिश्र

विनय कुमार मिश्रा मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय (MMMUT), गोरखपुर के रसायन विज्ञान एवं पर्यावरण विज्ञान विभाग में एक शोधार्थी (रिसर्च स्कॉलर) हैं। उन्होंने अपनी शैक्षणिक यात्रा उत्तर प्रदेश बोर्ड के अंतर्गत प्रारंभ की, जहाँ उन्होंने विज्ञान विषय में सुदृढ़ आधार के साथ अपनी माध्यमिक (10वीं) एवं उच्च माध्यमिक (12वीं) शिक्षा पूर्ण की। इसके पश्चात उन्होंने वीर बहादुर सिंह पूर्वांचल विश्वविद्यालय, जौनपुर से रसायन विज्ञान में स्नातक तथा स्नातकोत्तर शिक्षा प्राप्त की, जहाँ उनकी रुचि उन्नत रासायनिक अनुसंधान की ओर क्रमशः विकसित हुई। वर्तमान में श्री मिश्रा MMMUT, गोरखपुर से डॉक्टर ऑफ फिलॉसफी (Ph.D.) कर रहे हैं। उनका शोध कार्य अत्याधुनिक क्षेत्र कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण पर केंद्रित है, जिसमें विशेष रूप से वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) को मूल्यवर्धित रसायनों एवं कार्बनिक रूपांतरणों में परिवर्तित करने पर जोर दिया गया है। उनका अनुसंधान सतत रसायन विज्ञान, कार्बन प्रबंधन तथा स्वच्छ ऊर्जा समाधानों की दिशा में वैश्विक प्रयासों के अनुरूप है। श्री मिश्रा ने इस उभरते हुए शोध क्षेत्र में उल्लेखनीय योगदान दिया है, जिसे रॉयल सोसाइटी ऑफ केमिस्ट्री (RSC), Wiley तथा Elsevier जैसे अंतरराष्ट्रीय प्रतिष्ठित प्रकाशनों में प्रकाशित शोध पत्रों के माध्यम से मान्यता प्राप्त हुई है। अब तक उनके 10 शोध प्रकाशन प्रकाशित हो चुके हैं तथा उनके नाम 3 राष्ट्रीय पेटेंट दर्ज हैं, जो उनके शोध की अकादमिक गहराई एवं व्यावहारिक महत्त्व को दर्शाते हैं। इसके अतिरिक्त, उन्हें विभिन्न वैज्ञानिक उपकरणों का सुदृढ़ ज्ञान एवं अनुभव प्राप्त है, विशेष रूप से यूवी–विज़िबल स्पेक्ट्रोस्कोपी, फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड (FTIR) स्पेक्ट्रोस्कोपी, साइक्लिक वोल्टैमेट्री (CV) तथा संबंधित विश्लेषणात्मक एवं विद्युत-रासायनिक तकनीकों में। अपने शोध योगदान और तकनीकी दक्षता के माध्यम से श्री विनय कुमार मिश्रा सतत रसायन विज्ञान एवं कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण के क्षेत्र में एक उभरते हुए और संभावनाशील शोधकर्ता के रूप में स्वयं को स्थापित कर रहे हैं।

लेखक परिचय
कंचन शर्मा

सुश्री कंचन शर्मा वर्तमान में विज्ञान एवं अभियांत्रिकी अनुसंधान बोर्ड–सुरक्षित अनुसंधान (SERB–SURE), विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी विभाग (DST) द्वारा वित्तपोषित परियोजना के अंतर्गत जूनियर रिसर्च फेलो (JRF) के रूप में रसायन विज्ञान एवं पर्यावरण विज्ञान विभाग, मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय (MMMUT), गोरखपुर में कार्यरत हैं। साथ ही, वह इसी विभाग में प्रोफेसर डॉ. राजेश कुमार यादव के मार्गदर्शन में डॉक्टर ऑफ फिलॉसफी (पीएच.डी.) की शोधार्थी भी हैं। उन्होंने रसायन विज्ञान में स्नातकोत्तर (एम.एससी.) की डिग्री MMMUT, गोरखपुर से 9.37 के उत्कृष्ट सीजीपीए के साथ प्राप्त की, जो उनकी मजबूत शैक्षणिक पृष्ठभूमि को दर्शाता है। उनकी स्नातक (बी.एससी.) शिक्षा दीन दयाल उपाध्याय गोरखपुर विश्वविद्यालय से पूर्ण हुई, जबकि उनकी प्रारंभिक स्कूली शिक्षा लोरेटो कॉन्वेंट, दार्जिलिंग, पश्चिम बंगाल से हुई। स्नातकोत्तर शोध प्रबंध के दौरान उन्होंने फोटोकैटेलिसिस के क्षेत्र में एक शोध लेख तथा एक समीक्षा लेख का सफलतापूर्वक प्रकाशन किया। सुश्री शर्मा का शोध कार्य कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण अनुसंधान समूह के अंतर्गत केंद्रित है, जिसमें उनकी विशेष रुचि फोटोकैटेलिसिस, हाइड्रोजन उत्पादन, कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) अपचयन तथा फोटोकैटेलिटिक कार्बनिक रूपांतरणों में है। उनका शोध सतत रसायन विज्ञान, नवीकरणीय ऊर्जा तथा कार्बन-न्यूट्रल प्रौद्योगिकियों से संबंधित वैश्विक प्रयासों के अनुरूप है। उन्होंने इस उभरते हुए शोध क्षेत्र में महत्वपूर्ण योगदान दिया है, जिसे अंतरराष्ट्रीय स्तर पर प्रतिष्ठित जर्नलों में प्रकाशित उनके शोध कार्यों के माध्यम से मान्यता प्राप्त हुई है, जिनमें अमेरिकन केमिकल सोसाइटी (ACS), रॉयल सोसाइटी ऑफ केमिस्ट्री (RSC), वाइली, स्प्रिंगर तथा एल्सेवियर शामिल हैं। अब तक वह 32 शोध प्रकाशनों की लेखिका हैं तथा उनके नाम 14 राष्ट्रीय पेटेंट दर्ज हैं, जो उनके शोध की अकादमिक गहराई और व्यावहारिक उपयोगिता को दर्शाते हैं। अपने शोध कार्यों के अतिरिक्त, सुश्री शर्मा को यूवी–विज़िबल स्पेक्ट्रोस्कोपी, फूरियर ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड (FTIR) स्पेक्ट्रोस्कोपी, साइक्लिक वोल्टैमेट्री (CV), हाई-परफॉर्मेंस लिक्विड क्रोमैटोग्राफी (HPLC) एवं अन्य विश्लेषणात्मक तथा विद्युत-रासायनिक तकनीकों में ठोस प्रायोगिक दक्षता प्राप्त है। अपने शैक्षणिक योगदान, तकनीकी विशेषज्ञता तथा सतत अनुसंधान के प्रति समर्पण के माध्यम से सुश्री कंचन शर्मा कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण और हरित ऊर्जा विज्ञान के क्षेत्र में एक उदीयमान और संभावनाशील शोधकर्ता के रूप में स्वयं को स्थापित कर रही हैं।

लेखक परिचय

प्रो० राजेश कुमार यादव

डॉ. आर. के. यादव वर्तमान में मदन मोहन मालवीय प्रौद्योगिकी विश्वविद्यालय (MMMUT), गोरखपुर, भारत के रसायन विज्ञान एवं पर्यावरण विज्ञान विभाग में प्रोफेसर के पद पर कार्यरत हैं। उन्होंने अपनी बी.एससी. और एम.एससी. की शिक्षा वीर बहादुर सिंह पूर्वांचल विश्वविद्यालय, जौनपुर (उ.प्र.) से प्राप्त की। इसके पश्चात उन्होंने दिल्ली विश्वविद्यालय से सीसीएस विश्वविद्यालय, मेरठ (उ.प्र.) के सहयोग से प्रोफेसर मान सिंह एवं प्रोफेसर एच. एस. वर्मा के निर्देशन में पीएच.डी. उपाधि प्राप्त की। पीएच.डी. पूर्ण करने के बाद, डॉ. यादव ने आईआईटी दिल्ली, भारत में एक वर्ष तक पोस्ट-डॉक्टोरल फेलो के रूप में कार्य किया। इसके बाद उन्होंने कोरिया रिसर्च इंस्टीट्यूट ऑफ केमिकल टेक्नोलॉजी (KRICT), दक्षिण कोरिया में चार वर्षों तक पोस्ट-डॉक्टोरल फेलो तथा अगले चार वर्षों तक सीनियर साइंटिस्ट के रूप में सेवाएँ दीं। इसी अवधि में उन्हें उनकी उत्कृष्ट वैज्ञानिक उपलब्धियों के लिए प्रतिष्ठित रामानुजन फेलोशिप से भी सम्मानित किया गया। डॉ. यादव ने अपने शैक्षणिक करियर की शुरुआत दिसंबर 2017 में MMMUT, गोरखपुर के एप्लाइड साइंस विभाग में एसोसिएट प्रोफेसर के रूप में की और बाद में प्रोफेसर पद पर पदोन्नत हुए। उनका शोध रिकॉर्ड अत्यंत प्रभावशाली है; उनके नाम अंतरराष्ट्रीय जर्नलों में 209 से अधिक शोध प्रकाशन हैं, जिन पर 3878 से अधिक उद्धरण (citations) प्राप्त हुए हैं। उनके नाम 11 अंतरराष्ट्रीय पेटेंट एवं 54 राष्ट्रीय पेटेंट दर्ज हैं, साथ ही उन्होंने छह पुस्तक अध्याय भी लिखे हैं। एक समर्पित शोध-मार्गदर्शक के रूप में, डॉ. यादव ने अब तक 07 पीएच.डी. शोध प्रबंधों का सफल निर्देशन किया है, जबकि 13 शोधार्थी वर्तमान में उनके मार्गदर्शन में कार्यरत हैं। इसके अतिरिक्त, उन्होंने 66 परास्नातक (मास्टर्स) शोध प्रबंधों का निर्देशन किया है तथा 11 एम.एससी. शोध कार्य प्रगति पर हैं। उनके वैश्विक वैज्ञानिक योगदान को मान्यता देते हुए उन्हें स्टैनफोर्ड विश्वविद्यालय, अमेरिका द्वारा प्रकाशित विश्व के शीर्ष 2% वैज्ञानिकों की सूची में 2023, 2024 एवं 2025 में तीन बार शामिल किया गया है।

डॉ. यादव चार प्रमुख अनुसंधान परियोजनाओं में प्रधान अन्वेषक (PI) एवं सह-प्रधान अन्वेषक (Co-PI) के रूप में कार्य कर चुके हैं तथा उन्होंने एक राष्ट्रीय स्तर के वैज्ञानिक सम्मेलन का भी आयोजन किया है। उनकी शोध विशेषज्ञता सतत ऊर्जा एवं पर्यावरणीय अनुप्रयोगों के लिए कम लागत वाले, अत्यधिक दक्ष प्रकाश-सक्रिय फोटोकैटलिस्टों के विकास में है। उनका शोध कार्य फोटोकैटलिटिक एवं इलेक्ट्रोकैटलिटिक जल-विघटन, हाइड्रोजन एवं ऑक्सीजन उत्पादन, CO_2 एवं N_2 स्थिरीकरण, तथा सौर ईंधन एवं रसायनों के संश्लेषण पर केंद्रित है। वे जल के विकल्प के रूप में कार्बनिक सब्सट्रेट्स के उपयोग, फोटोकैटलिटिक कार्बनिक रूपांतरणों, तथा डाई अपघटन, पर्यावरणीय शोधन एवं हरित ऊर्जा अनुप्रयोगों के लिए नवीन सामग्री के विकास पर भी कार्य कर रहे हैं। कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण तथा प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण की बायोमिमेटिक रसायनिकी से प्रेरित होकर उनका शोध सौर ऊर्जा के कुशल उपयोग, ईंधन उत्पादन, पर्यावरणीय स्थिरता तथा नेट-ज़ीरो कार्बन उत्सर्जन के लक्ष्य को प्राप्त करने की दिशा में केंद्रित है।

1. भूमिका

प्रकृति ने जटिल समस्याओं के लिए सदैव सुंदर और प्रभावी समाधान प्रदान किए हैं, और प्रकाश संश्लेषण इसका एक श्रेष्ठ उदाहरण है। इस प्रक्रिया के माध्यम से पौधे, शैवाल और कुछ सूक्ष्मजीव सूर्य के प्रकाश को ग्रहण कर उसे रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करते हैं, जिससे पृथ्वी पर जीवन संभव हो पाता है। इसी प्राकृतिक प्रक्रिया से प्रेरित होकर वैज्ञानिकों ने कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की अवधारणा विकसित की है, जिसका उद्देश्य सौर ऊर्जा को उपयोगी ईंधनों में बदलने की प्रकृति की रणनीति का अनुकरण करना है।

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण में सूर्य का प्रकाश, जल और कार्बन डाइऑक्साइड का उपयोग कर हाइड्रोजन अथवा अन्य कार्बन-आधारित स्वच्छ एवं नवीकरणीय ईंधनों का उत्पादन किया जाता है। जीवाश्म ईंधनों पर आधारित पारंपरिक ऊर्जा तकनीकों के विपरीत, यह प्रक्रिया एक सतत और पर्यावरण-अनुकूल ऊर्जा चक्र स्थापित करने का प्रयास करती है। रसायन विज्ञान, भौतिकी, पदार्थ विज्ञान और अभियांत्रिकी जैसे विभिन्न विषयों का समन्वय होने के कारण यह क्षेत्र एक बहुविषयक दृष्टिकोण प्रस्तुत करता है।

यह अध्याय कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की मूल अवधारणाओं, कार्य सिद्धांतों, अनुप्रयोगों, चुनौतियों और भविष्य की संभावनाओं को सरल एवं मानव-केंद्रित शैक्षणिक शैली में प्रस्तुत करता है। [1]

सौर ऊर्जा को सीधे रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित कर नवीकरणीय और गैर-प्रदूषक ईंधनों का उत्पादन करना इस शताब्दी की एक महान और अत्यंत चुनौतीपूर्ण समस्या बनी हुई है। सौर ऊर्जा रूपांतरण की सबसे आशाजनक विधियों में से एक, जिसके माध्यम से कार्बनिक रसायनों या ईंधनों का संश्लेषण किया जा सकता है, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण है। कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण के लिए अनेक दृष्टिकोणों का अध्ययन किया गया है, जिनमें से कुछ में अर्धचालक, संक्रमण-धातु संकुल (transition-metal complexes) आदि प्रकाश-उत्प्रेरकों का उपयोग किया जाता है।

यद्यपि प्रकाश-उत्प्रेरित कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की व्यवहार्यता सिद्ध हो चुकी है, फिर भी पारंपरिक प्रणालियों में इसके साथ कई समस्याएँ जुड़ी हुई हैं, जैसे ऊर्जा रूपांतरण की कम दक्षता, उत्पादों की कम चयनात्मकता तथा प्रकाश-उत्प्रेरक की स्थायित्व संबंधी समस्याएँ।

पूर्ववर्ती अध्ययन में हमने $W_2Fe_4Ta_2O_{17}$ को एक प्रकाश-उत्प्रेरक के रूप में रिपोर्ट किया था, जिसे प्रकाश-उत्प्रेरक–एंज़ाइम युग्मित प्रणाली में प्रयोग किया गया। प्रकाश-उत्प्रेरक–एंज़ाइम युग्मित प्रणाली कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की सबसे आदर्श प्रणालियों में से एक मानी जाती है, जो सौर ऊर्जा का उपयोग कर विभिन्न रसायनों और ईंधनों का संश्लेषण करती है। [1]

इस प्रकार की कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रक्रिया के व्यावहारिक उपयोग के लिए सबसे बड़ी चुनौतियों में से एक ऐसा अत्यधिक दक्ष दृश्य-प्रकाश सक्रिय पदार्थ खोजना है, जो निकोटिनामाइड डाइन्यूक्लियोटाइड (NADH) पुनर्जनन प्रणाली में प्रकाश-उत्प्रेरक के रूप में कार्य करे और CO_2 से सौर-रसायनों अथवा सौर-ईंधनों के एंज़ाइमीय उत्पादन को सक्रिय करे। चूँकि ऊर्जा की दृष्टि से पृथ्वी पर उपलब्ध कुल सौर प्रकाश का लगभग 46% भाग दृश्य क्षेत्र में तथा केवल 4% पराबैंगनी (UV) क्षेत्र में होता है, इसलिए वास्तविक और प्रभावी सौर ऊर्जा रूपांतरण के लिए यह अत्यंत आवश्यक है कि प्रकाश-उत्प्रेरण प्रक्रिया दृश्य प्रकाश में कार्यशील हो। [2]

ग्राफीन ने पदार्थ विज्ञान, संघनित पदार्थ भौतिकी और रसायन विज्ञान के क्षेत्रों में एक उभरते हुए सुपरस्टार के रूप में स्वयं को सिद्ध

किया है, क्योंकि इसमें असाधारण इलेक्ट्रॉनिक, तापीय, प्रकाशीय और यांत्रिक गुण पाए जाते हैं।

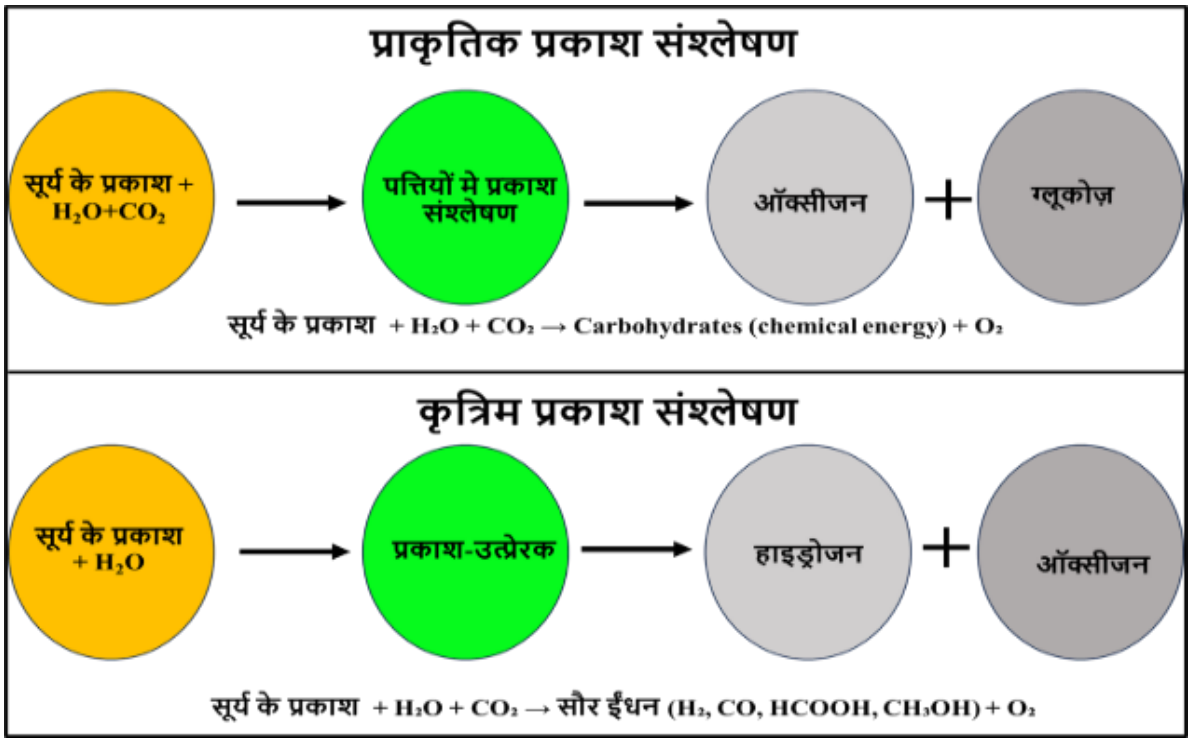
हाल ही में ग्राफीन और प्रकाश-उत्प्रेरक के कुछ संयुक्त (Composite) उदाहरण रिपोर्ट किए गए हैं। इनमें सामान्यतः टाइटेनियम डाइऑक्साइड (TiO_2) जैसे धातु ऑक्साइड अर्धचालक प्रकाश-उत्प्रेरकों और ग्राफीन के सरल संयोजन शामिल हैं। किंतु ग्राफीन–धातु ऑक्साइड अर्धचालक के ये कॉम्पोज़िट प्रकाश-उत्प्रेरक-जैव-उत्प्रेरक (photocatalyst–biocatalyst) युग्मित प्रणालियों के लिए उपयुक्त नहीं होते, क्योंकि इनके चालक बैंड (conduction band) किनारों का आंतरिक ऊर्जा स्तर अपेक्षाकृत कम होता है।

धातु ऑक्साइड के चालक बैंड किनारों और रोडियम संकुल (rhodium complex) के अपचयन विभव (reduction potential) के बीच ऊर्जा अंतर बहुत कम होने के कारण, धातु ऑक्साइड में उत्पन्न प्रकाश-उत्तेजित इलेक्ट्रॉनों का अपचयन केंद्र तक स्थानांतरण कठिन हो जाता है। परिणामस्वरूप, NADH के पुनर्जनन की दक्षता अत्यंत कम हो जाती है।

इस कार्य में हम एक नवीन ग्राफीन-आधारित, दृश्य-प्रकाश सक्रिय प्रकाश-उत्प्रेरक के संश्लेषण की रिपोर्ट करते हैं, जिसमें मल्टीएन्थ्राक्विनोन प्रतिस्थापित पोर्फिरिन (MAQSP) जैसे क्रोमोफोर को रासायनिक रूप से परिवर्तित ग्राफीन (CCG) के साथ सहसंयोजक (covalent) बंध द्वारा जोड़ा गया है। इस प्रणाली का उपयोग प्रकाश-उत्प्रेरक–एंज़ाइम युग्मित प्रणाली में CO_2 से फॉर्मिक अम्ल के कुशल कृत्रिम प्रकाश संश्लेषणीय उत्पादन के लिए किया गया है। [3]

प्राप्त परिणाम न केवल कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण में सामान्य रूप से ग्राफीन-आधारित पदार्थों के प्रकाश-उत्प्रेरक के रूप में उपयोग का एक मानक उदाहरण प्रस्तुत करते हैं, बल्कि CO_2 से सीधे सौर रसायनों/सौर ईंधनों के चयनात्मक उत्पादन की एक उत्कृष्ट प्रणाली को भी प्रदर्शित करते हैं।

(चित्र-1)



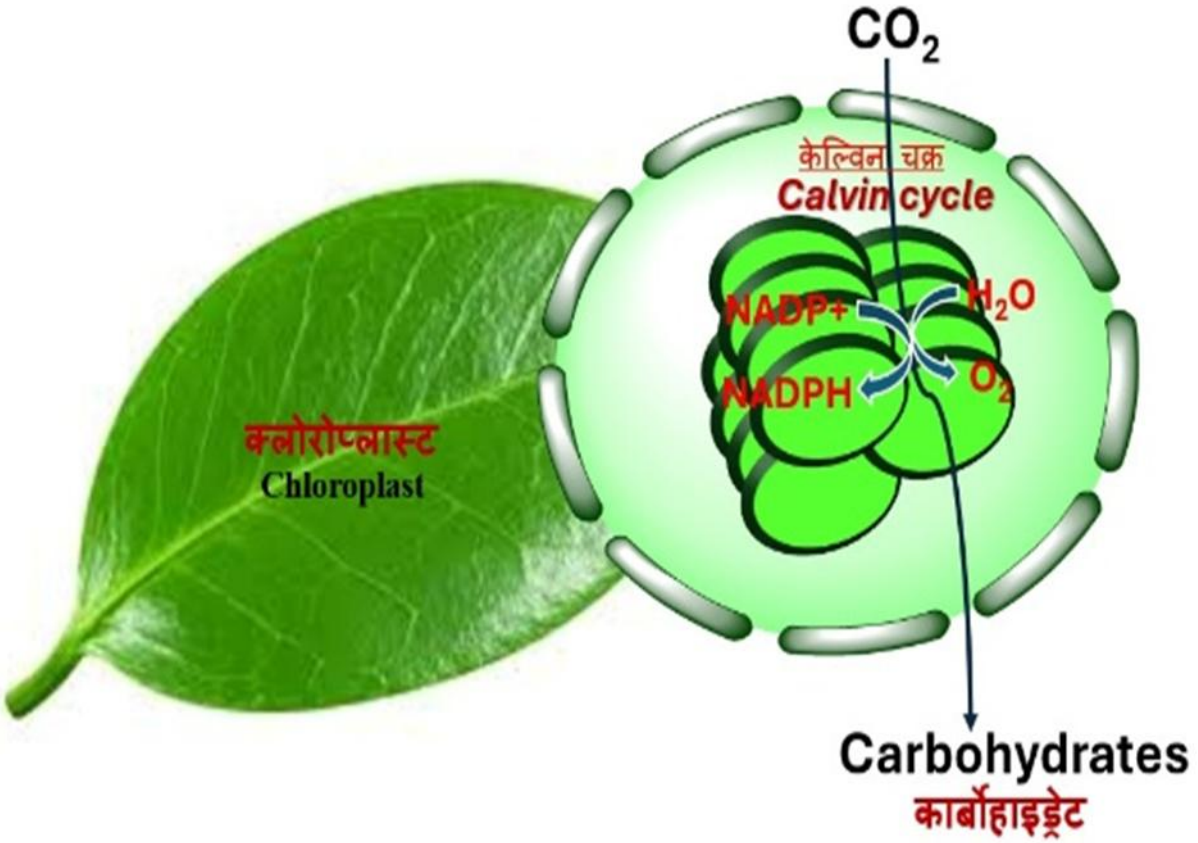
चित्र-1: प्राकृतिक एवं कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की योजनात्मक तुलना

2. मुख्य भाग्य

2.1 प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण से प्रेरणा

प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण पृथ्वी पर जीवन को बनाए रखने वाली सबसे महत्वपूर्ण जैव-रासायनिक प्रक्रियाओं में से एक है। यह प्रक्रिया मुख्य रूप से हरे पौधों, शैवालों और कुछ जीवाणुओं की कोशिकाओं में स्थित क्लोरोप्लास्ट नामक विशेष संरचनाओं में सम्पन्न होती है। प्रकाश संश्लेषण के माध्यम से पौधे सूर्य के प्रकाश की ऊर्जा को रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करते हैं, जिसका उपयोग वे अपने विकास और जीवन-क्रियाओं के लिए करते हैं। यही प्रक्रिया अप्रत्यक्ष रूप से समस्त जीव-जगत के लिए भोजन और ऑक्सीजन का स्रोत भी है। प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया का पहला चरण सूर्य के प्रकाश का अवशोषण है। यह कार्य क्लोरोफिल तथा अन्य सहायक वर्णकों द्वारा किया जाता है, जो प्रकाश की ऊर्जा को ग्रहण करते हैं। प्रकाश के अवशोषण से वर्णकों में स्थित इलेक्ट्रॉनों में ऊर्जा का संचार होता है, जिससे उनका उच्च ऊर्जा अवस्था में संक्रमण होता है। इसके परिणामस्वरूप विद्युत आवेशों का पृथक्करण होता है, जो इस पूरी प्रक्रिया का आधार है। यह चरण अत्यंत महत्वपूर्ण है, क्योंकि इसी से आगे की रासायनिक अभिक्रियाओं के लिए आवश्यक ऊर्जा प्राप्त होती है। अगले चरण में जल अणुओं का अपघटन होता है, जिसे जल का प्रकाश अपघटन (फोटोलाइसिस) कहा जाता है। इस प्रक्रिया में जल अणु टूटकर ऑक्सीजन, प्रोटॉन और इलेक्ट्रॉनों में विभाजित हो जाते हैं। ऑक्सीजन एक उप-उत्पाद के रूप में वायुमंडल में मुक्त हो जाती है, जो पृथ्वी पर जीवन के लिए अनिवार्य है। इसी चरण में उत्पन्न इलेक्ट्रॉन और प्रोटॉन आगे की रासायनिक अभिक्रियाओं में भाग लेते हैं और ऊर्जा को रासायनिक रूप में संचित करने में सहायता करते हैं, जैसे कि ATP और NADPH अणुओं के निर्माण में। प्रकाश संश्लेषण का अंतिम चरण कार्बन स्थिरीकरण से संबंधित है, जिसे कैल्विन चक्र के नाम से जाना जाता है (चित्र-

2)। इसमें पहले चरणों में संचित रासायनिक ऊर्जा का उपयोग कर वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड को शर्करा जैसे कार्बनिक यौगिकों में परिवर्तित किया जाता है। ये शर्कराएँ पौधों के लिए ऊर्जा भंडार और संरचनात्मक घटक के रूप में कार्य करती हैं। इस प्रकार, प्रकाश संश्लेषण सूर्य की ऊर्जा को भोजन के रूप में संचित करने की एक अत्यंत कुशल प्राकृतिक प्रणाली है। कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण इस जटिल प्राकृतिक प्रक्रिया की पूर्ण नकल करने का प्रयास नहीं करता, बल्कि इसके प्रमुख और आवश्यक चरणों को समझकर उन्हें कृत्रिम पदार्थों और प्रणालियों के माध्यम से दोहराने का प्रयास करता है। इसमें मुख्य रूप से प्रकाश अवशोषण, आवेश पृथक्करण और रासायनिक रूपांतरण जैसे चरणों को शामिल किया जाता है। वैज्ञानिक अर्धचालक पदार्थों, धातु जटिलों और उत्प्रेरकों का उपयोग करके ऐसी प्रणालियाँ विकसित कर रहे हैं, जो सूर्य के प्रकाश की सहायता से जल या कार्बन डाइऑक्साइड को उपयोगी ईंधनों और रसायनों में बदल सकें। प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण की उच्च दक्षता और स्थिरता से प्रेरणा लेकर विकसित की जा रही कृत्रिम प्रणालियाँ भविष्य की स्वच्छ और सतत ऊर्जा आवश्यकताओं को पूरा करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकती हैं। इस प्रकार, प्रकृति के इन कुशल तंत्रों का गहन अध्ययन न केवल वैज्ञानिक समझ को बढ़ाता है, बल्कि ऊर्जा उत्पादन के नए और पर्यावरण-अनुकूल मार्ग भी खोलता है। [4]



चित्र 2: पौधों मे प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण की क्रिया

2.2 कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की मूल अवधारणाएँ

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण एक अत्याधुनिक और बहु-विषयक वैज्ञानिक अवधारणा है, जिसका मुख्य उद्देश्य सूर्य के प्रकाश की ऊर्जा को सीधे उपयोगी रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करना है। यह प्रक्रिया प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण से प्रेरित है, किंतु इसका लक्ष्य केवल प्रकृति की नकल करना नहीं, बल्कि उसकी मूलभूत अवधारणाओं को समझकर उन्हें अधिक नियंत्रित, कुशल और व्यावहारिक रूप में लागू करना है। बढ़ती वैश्विक ऊर्जा मांग, जीवाश्म ईंधनों की सीमित उपलब्धता और पर्यावरण प्रदूषण की समस्याओं को देखते हुए कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण को भविष्य की स्वच्छ और सतत ऊर्जा तकनीक के रूप में देखा जा रहा है।

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की पूरी प्रक्रिया मुख्यतः तीन आवश्यक और परस्पर जुड़े चरणों पर आधारित होती है—प्रकाश का अवशोषण, आवेश पृथक्करण एवं संचलन, तथा उत्प्रेरक-चालित रासायनिक रूपांतरण। इन तीनों चरणों की दक्षता और आपसी समन्वय ही संपूर्ण प्रणाली के प्रदर्शन को निर्धारित करता है। [5]

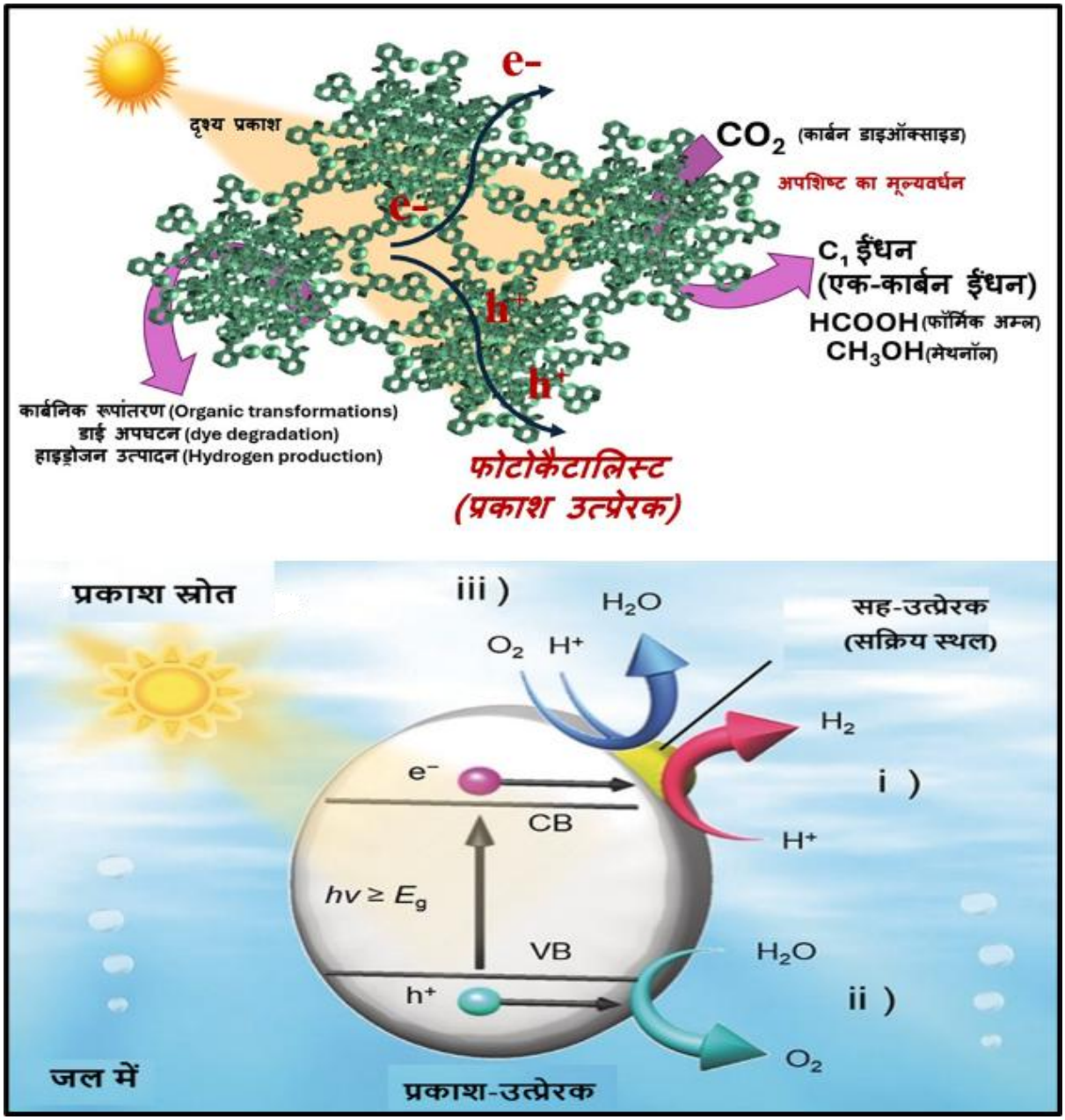
पहला चरण सूर्य के प्रकाश का प्रभावी अवशोषण है, इसके लिए ऐसे पदार्थों का चयन किया जाता है जो सौर विकिरण के अधिकतम भाग को ग्रहण कर सकें। सामान्यतः अर्धचालक पदार्थ जैसे टाइटेनियम डाइऑक्साइड, सिलिकॉन, ग्रेफाइटिक कार्बन नाइट्राइड, या विभिन्न धातु जटिल यौगिक और प्रकाश-संवेदी अणु इस उद्देश्य के लिए उपयोग किए जाते हैं। जब ये पदार्थ सूर्य के प्रकाश को अवशोषित करते हैं, तो उनमें उपस्थित इलेक्ट्रॉन निम्न ऊर्जा

अवस्था से उच्च ऊर्जा अवस्था में उत्तेजित हो जाते हैं। यही उत्तेजित इलेक्ट्रॉन आगे की रासायनिक अभिक्रियाओं के लिए ऊर्जा का स्रोत बनते हैं।

दूसरा चरण आवेश वाहकों, अर्थात् इलेक्ट्रॉन और होल, के निर्माण, पृथक्करण और संचलन से संबंधित होता है। प्रकाश अवशोषण के बाद उत्पन्न इलेक्ट्रॉन–होल युग्मों का शीघ्र पुनः संयोजन प्रणाली की दक्षता को गंभीर रूप से कम कर सकता है। इसलिए यह अत्यंत आवश्यक होता है कि इन आवेश वाहकों को प्रभावी रूप से अलग किया जाए और उन्हें उपयुक्त दिशा में प्रवाहित किया जाए। इस उद्देश्य के लिए विभिन्न संरचनात्मक डिज़ाइन, डोपिंग तकनीकें और सह-उत्प्रेरकों का उपयोग किया जाता है, जिससे आवेश पृथक्करण की अवधि बढ़ाई जा सके।

तीसरा और अंतिम चरण उत्प्रेरक, चालित रासायनिक अभिक्रियाओं का होता है। इस चरण में उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों का उपयोग कर जल के अपघटन से हाइड्रोजन उत्पन्न किया जाता है या कार्बन डाइऑक्साइड को उपयोगी ईंधनों जैसे मीथेनॉल, फॉर्मिक एसिड या अन्य कार्बनिक यौगिकों में परिवर्तित किया जाता है। इन अभिक्रियाओं को कुशलतापूर्वक संचालित करने के लिए उपयुक्त उत्प्रेरकों की आवश्यकता होती है, जो अभिक्रिया की सक्रियण ऊर्जा को कम कर सकें और चयनात्मकता को बढ़ा सकें। [6]

इस प्रकार, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण सूर्य की अक्षय ऊर्जा को स्वच्छ ईंधनों और रसायनों में परिवर्तित करने का एक आशाजनक मार्ग प्रस्तुत करता है। यदि इस तकनीक को बड़े पैमाने पर सफलतापूर्वक विकसित किया जा सके, तो यह न केवल ऊर्जा संकट को कम करने में सहायक होगी, बल्कि कार्बन उत्सर्जन को घटाकर पर्यावरण संरक्षण में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगी। (चित्र-3)



चित्र-3: कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया

2.3 कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियों के प्रमुख घट

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण एक उभरती हुई और अत्यंत महत्वपूर्ण वैज्ञानिक तकनीक है, जिसका उद्देश्य सूर्य के प्रकाश की अक्षय ऊर्जा को उपयोगी रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित करना है। यह अवधारणा प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण से प्रेरित है, किंतु इसमें प्रकृति की जटिल प्रक्रियाओं की प्रतिकृति करने के बजाय उनके मूल सिद्धांतों को समझकर उन्हें कृत्रिम और नियंत्रित प्रणालियों में लागू किया जाता है। किसी भी कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणाली की सफलता उसके विभिन्न घटकों के कुशल, समन्वित और स्थिर कार्य पर निर्भर करती है। इन प्रणालियों के प्रमुख घटकों में प्रकाश-अवशोषक पदार्थ, आवेश पृथक्करण एवं परिवहन तंत्र तथा ऊर्जा रूपांतरण के लिए उत्प्रेरक शामिल हैं, जो मिलकर संपूर्ण प्रक्रिया की दक्षता और व्यावहारिकता को निर्धारित करते हैं।

प्रकाश-अवशोषक पदार्थ कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणाली की आधारशिला होते हैं, क्योंकि इन्हीं के माध्यम से सूर्य के प्रकाश की ऊर्जा को ग्रहण किया जाता है। सूर्य से पृथ्वी पर पहुँचने वाले कुल सौर विकिरण का अधिकांश भाग दृश्य क्षेत्र में होता है, इसलिए प्रभावी प्रकाश-अवशोषक पदार्थों का चयन इस क्षेत्र में अधिकतम अवशोषण क्षमता के आधार पर किया जाता है। यदि प्रकाश का समुचित अवशोषण न हो, तो आगे की सभी रासायनिक प्रक्रियाएँ सीमित हो जाती हैं और संपूर्ण प्रणाली की कार्यक्षमता प्रभावित होती है। इस उद्देश्य के लिए टाइटेनियम डाइऑक्साइड जैसे धातु ऑक्साइड, सिलिकॉन और ग्रेफैटिक कार्बन नाइट्राइड जैसे अर्धचालक पदार्थ, विभिन्न कार्बनिक रंग (डाई), तथा पेरोव्स्काइट जैसे उन्नत पदार्थ व्यापक रूप से उपयोग किए जा रहे हैं। ये पदार्थ सूर्य के प्रकाश को अवशोषित कर इलेक्ट्रॉनों को निम्न ऊर्जा अवस्था से उच्च ऊर्जा अवस्था में उत्तेजित करते हैं, जिससे ऊर्जा-संपन्न आवेश वाहक उत्पन्न होते हैं जो आगे की रासायनिक अभिक्रियाओं को संचालित करते हैं। आधुनिक अनुसंधान में प्रकाश-अवशोषक पदार्थों की संरचना, आकार और सतह गुणों को नैनोस्तर पर नियंत्रित करने पर विशेष ध्यान दिया जा रहा है। नैनो-संरचित पदार्थों में सतह क्षेत्र अधिक होता है, जिससे प्रकाश के साथ अंतःक्रिया की संभावना बढ़ जाती है और अवशोषण दक्षता में सुधार होता है। इसके अतिरिक्त, नैनोस्तर पर बैंड गैप को नियंत्रित कर दृश्य प्रकाश क्षेत्र में अवशोषण को अनुकूल बनाया जा सकता है। डोपिंग, सतह संशोधन और समिश्र पदार्थों के निर्माण जैसी तकनीकों के माध्यम से प्रकाश-अवशोषण क्षमता के साथ-साथ पदार्थों की स्थिरता और पुनः उपयोगिता को भी बढ़ाने का प्रयास किया जा रहा है। हालाँकि, केवल उच्च प्रकाश-अवशोषण क्षमता पर्याप्त नहीं होती। प्रकाश-अवशोषक पदार्थों का दीर्घकालिक स्थायित्व भी अत्यंत महत्वपूर्ण होता है। कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियाँ प्रायः खुले वातावरण में या जलीय माध्यमों में कार्य करती हैं, जहाँ निरंतर सूर्य प्रकाश, ऑक्सीकरण और रासायनिक अभिक्रियाओं के कारण पदार्थों का क्षरण संभव है। इसलिए यह आवश्यक होता है कि प्रकाश-अवशोषक पदार्थ लंबे समय तक अपनी संरचना और कार्यक्षमता बनाए रखें। साथ ही, इन पदार्थों की प्रणाली के अन्य घटकों, जैसे आवेश परिवहन माध्यम और उत्प्रेरकों, के साथ संगतता भी अनिवार्य है, ताकि आवेशों का प्रभावी स्थानांतरण और रासायनिक अभिक्रियाओं का सुचारु संचालन सुनिश्चित किया जा सके।

प्रकाश अवशोषण के बाद अगला महत्वपूर्ण चरण आवेश पृथक्करण और परिवहन का होता है। जब प्रकाश-अवशोषक पदार्थ सूर्य के प्रकाश को ग्रहण करते हैं, तो इलेक्ट्रॉन और होल के युग्म उत्पन्न होते हैं। यदि ये आवेश वाहक शीघ्र ही पुनः संयोजित हो जाएँ, तो संचित ऊर्जा ऊष्मा के रूप में नष्ट हो जाती है और प्रणाली की दक्षता में भारी गिरावट आती है। इसलिए यह अत्यंत आवश्यक होता है कि इलेक्ट्रॉन और होल को प्रभावी रूप से अलग किया जाए और उन्हें उपयुक्त अभिक्रिया स्थलों तक पहुँचाया जाए। इस उद्देश्य के लिए विभिन्न संरचनात्मक और सामग्री-आधारित रणनीतियाँ अपनाई जाती हैं।

नैनो-संरचित पदार्थों का उपयोग आवेश पृथक्करण और परिवहन को बेहतर बनाने में विशेष रूप से सहायक सिद्ध हुआ है। नैनो आकार के कणों या नैनो-रॉड्स में आवेश वाहकों को कम दूरी तय करनी पड़ती है, जिससे उनके पुनः संयोजन की संभावना घट जाती है। इसी प्रकार, परतदार या हेटरो-संरचित प्रणालियाँ, जिनमें दो या अधिक भिन्न अर्धचालक पदार्थों को संयोजित किया जाता है, आवेशों के दिशा-नियंत्रित पृथक्करण में सहायता करती हैं। इन संरचनाओं में एक पदार्थ इलेक्ट्रॉनों को और दूसरा होल को प्राथमिकता से परिवहन करता है, जिससे आवेश पृथक्करण की दक्षता में उल्लेखनीय वृद्धि होती है। इसके अतिरिक्त, आवेश परिवहन को और अधिक प्रभावी बनाने के लिए चालक परतों, सह-उत्प्रेरकों और इंटरफेस इंजीनियरिंग का भी सहारा लिया जाता है। इंटरफेस पर ऊर्जा स्तरों का उचित संरेखण यह सुनिश्चित करता है कि इलेक्ट्रॉन और होल बिना किसी बड़े अवरोध के अपनी-अपनी दिशाओं में प्रवाहित हो सकें। इस प्रकार, आवेश पृथक्करण और परिवहन की दक्षता बढ़ाकर संपूर्ण कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणाली के समग्र प्रदर्शन में सुधार किया जा सकता है।[7,8]

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियों का तीसरा और अत्यंत महत्वपूर्ण घटक ऊर्जा रूपांतरण के लिए उत्प्रेरक होते हैं। उत्प्रेरक रासायनिक अभिक्रियाओं की सक्रियण ऊर्जा को कम कर उनकी गति को बढ़ाते हैं और वांछित उत्पादों के प्रति चयनात्मकता प्रदान करते हैं। इन प्रणालियों में मुख्यतः तीन प्रकार की अभिक्रियाएँ महत्वपूर्ण होती हैं—जल का ऑक्सीकरण, जल या प्रोटॉनों से हाइड्रोजन का उत्पादन, तथा कार्बन डाइऑक्साइड का अपचयन। ये सभी अभिक्रियाएँ बहु-इलेक्ट्रॉन और बहु-प्रोटॉन प्रक्रियाएँ होती हैं, जिनके लिए अत्यंत कुशल और स्थिर उत्प्रेरकों की आवश्यकता होती है।

प्रारंभिक अनुसंधान में इन अभिक्रियाओं के लिए प्लेटिनम, रुथेनियम और इरिडियम जैसी बहुमूल्य धातुओं पर आधारित उत्प्रेरकों का व्यापक उपयोग किया गया, क्योंकि वे उच्च गतिविधि और अच्छी स्थिरता प्रदर्शित करते हैं। किंतु इन धातुओं की उच्च लागत और सीमित उपलब्धता के कारण बड़े पैमाने पर इनके उपयोग में व्यावहारिक कठिनाइयाँ उत्पन्न होती हैं। परिणामस्वरूप, वर्तमान अनुसंधान का ध्यान पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में उपलब्ध, कम लागत वाले और पर्यावरण-अनुकूल उत्प्रेरकों के विकास की ओर केंद्रित हो गया है। इसमें ट्रांजिशन मेटल ऑक्साइड्स, सल्फाइड्स, फॉस्फाइड्स, नाइट्राइड्स तथा कार्बन-आधारित उत्प्रेरक प्रमुख हैं।

उत्प्रेरकों की कार्यक्षमता न केवल उनकी रासायनिक संरचना पर निर्भर करती है, बल्कि उनके आकार, सतह गुणों और प्रकाश-अवशोषक पदार्थों के साथ उनके संपर्क पर भी निर्भर करती है। इसलिए उत्प्रेरक और प्रकाश-अवशोषक के बीच मजबूत और कुशल इंटरफेस का निर्माण अत्यंत आवश्यक होता है। सह-उत्प्रेरकों का उपयोग कर इलेक्ट्रॉनों को विशिष्ट अभिक्रिया स्थलों की ओर निर्देशित किया जा सकता है, जिससे ऊर्जा हानि कम होती है और उत्पाद निर्माण की दर बढ़ती है।

इन सभी घटकों—प्रकाश-अवशोषक पदार्थ, आवेश पृथक्करण एवं परिवहन तंत्र, और उत्प्रेरक—का समन्वित और संतुलित कार्य ही एक प्रभावी कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणाली की नींव रखता है। यदि इनमें से किसी एक घटक की दक्षता कम हो, तो संपूर्ण प्रणाली का प्रदर्शन प्रभावित हो सकता है। इसलिए आधुनिक अनुसंधान में इन घटकों को अलग-अलग विकसित करने के साथ-साथ उन्हें एकीकृत प्रणालियों के रूप में डिजाइन करने पर भी विशेष बल दिया जा रहा है।[9]

अंततः, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियों के प्रमुख घटकों का गहन अध्ययन और सतत सुधार न केवल इस तकनीक की दक्षता को बढ़ाने में सहायक होगा, बल्कि इसे प्रयोगशाला स्तर से व्यावहारिक और औद्योगिक स्तर तक पहुँचाने में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगा। भविष्य में, इन प्रणालियों के माध्यम से सूर्य की अक्षय ऊर्जा का उपयोग कर स्वच्छ ईंधनों और मूल्यवान रसायनों का उत्पादन संभव हो सकेगा, जो वैश्विक ऊर्जा संकट और पर्यावरण संरक्षण दोनों ही दृष्टियों से अत्यंत लाभकारी सिद्ध होगा।

2.4 सौर जल-विभाजन और हाइड्रोजन उत्पादन

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण का एक महत्वपूर्ण और व्यावहारिक अनुप्रयोग सूर्य के प्रकाश की सहायता से जल का हाइड्रोजन और ऑक्सीजन में अपघटन करना है, जिसे जल विभाजन प्रक्रिया कहा जाता है। इस प्रक्रिया में सूर्य की अक्षय ऊर्जा का उपयोग कर रासायनिक बंधों को तोड़ा जाता है, जिससे हाइड्रोजन जैसे उच्च ऊर्जा घनत्व वाले ईंधन का उत्पादन संभव होता है। हाइड्रोजन को भविष्य का स्वच्छ ईंधन माना जाता है, क्योंकि इसके दहन या ईंधन कोशिकाओं में उपयोग के दौरान केवल जल ही उप-उत्पाद के रूप में प्राप्त होता है, जिससे किसी भी प्रकार का कार्बन उत्सर्जन नहीं होता।

इस उद्देश्य के लिए फोटोइलेक्ट्रोकेमिकल (PEC) सेल और फोटोकैटेलिटिक प्रणालियाँ प्रमुख तकनीकों के रूप में विकसित की जा रही हैं। फोटोइलेक्ट्रोकेमिकल सेल में प्रकाश-अवशोषक अर्धचालक इलेक्ट्रोड सूर्य के प्रकाश को अवशोषित कर इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उत्पन्न करते हैं, जो क्रमशः जल के अपचयन और ऑक्सीकरण अभिक्रियाओं को संचालित करते हैं। वहीं फोटोकैटेलिटिक प्रणालियों में प्रकाश-संवेदी उत्प्रेरक जलीय माध्यम में सूर्य प्रकाश के प्रभाव से जल को सीधे हाइड्रोजन और ऑक्सीजन में विभाजित करते हैं।

इन तकनीकों की प्रमुख चुनौती उच्च दक्षता, दीर्घकालिक स्थिरता और कम लागत वाले पदार्थों का विकास है। इन चुनौतियों के समाधान से कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण आधारित जल विभाजन भविष्य की स्वच्छ और सतत ऊर्जा आवश्यकताओं को पूरा करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकता है।[10]

2.5 कार्बन डाइऑक्साइड रूपांतरण और सौर ईंधन

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण कार्बन डाइऑक्साइड जैसी ग्रीनहाउस गैस को उपयोगी ईंधनों और मूल्यवर्धित रसायनों में परिवर्तित करने का एक प्रभावी और पर्यावरण-अनुकूल मार्ग प्रदान करता है। इस प्रक्रिया का मुख्य उद्देश्य वायुमंडल में उपस्थित CO_2 की मात्रा को कम करने के साथ-साथ सूर्य की अक्षय ऊर्जा का उपयोग कर रासायनिक ऊर्जा का भंडारण करना है। प्राकृतिक कार्बन चक्र से प्रेरित यह तकनीक मानव-निर्मित प्रणालियों में कार्बन के पुनः उपयोग की संभावना को साकार करती है।

सूर्य-प्रेरित कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रक्रियाओं में उपयुक्त प्रकाश-अवशोषक पदार्थ और उत्प्रेरकों की सहायता से CO_2 का अपचयन किया जाता है। इस दौरान उत्पन्न उच्च ऊर्जा वाले इलेक्ट्रॉनों का उपयोग कर कार्बन डाइऑक्साइड को कार्बन मोनोऑक्साइड, मेथनॉल, फॉर्मिक अम्ल या अन्य हाइड्रोकार्बन यौगिकों में बदला जा सकता है। कार्बन मोनोऑक्साइड औद्योगिक संश्लेषण में एक महत्वपूर्ण कच्चा पदार्थ है, जबकि मेथनॉल और फॉर्मिक अम्ल स्वच्छ ईंधन, ऊर्जा वाहक और रासायनिक उद्योग में बहुउपयोगी यौगिक के रूप में कार्य करते हैं। [11]

हालाँकि, CO_2 अपचयन एक बहु-इलेक्ट्रॉन प्रक्रिया होने के कारण तकनीकी रूप से चुनौतीपूर्ण है। इसके लिए उच्च चयनात्मकता, दक्षता और स्थिरता वाले उत्प्रेरकों का विकास आवश्यक है। यदि इन चुनौतियों का समाधान किया जा सके, तो कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण आधारित CO_2 रूपांतरण न केवल जलवायु परिवर्तन को कम करने में सहायक होगा, बल्कि सतत ऊर्जा और हरित रसायनों के उत्पादन का एक नया मार्ग भी प्रशस्त करेगा।

2.6 हालिया प्रगति और तकनीकी विकास

नैनोप्रौद्योगिकी और पदार्थ विज्ञान में हाल के वर्षों में हुई तीव्र प्रगति ने कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण प्रणालियों की दक्षता और स्थायित्व में उल्लेखनीय सुधार किया है। नैनोस्तर पर पदार्थों की संरचना, आकार और सतह गुणों को नियंत्रित करने की क्षमता ने प्रकाश-अवशोषण को बढ़ाने, आवेश पृथक्करण को प्रभावी बनाने और ऊर्जा हानि को कम करने में महत्वपूर्ण योगदान दिया है। नैनो-संरचित अर्धचालक, हेटरो-संरचनाएँ और समिश्र पदार्थ दृश्य प्रकाश के अधिकतम उपयोग को संभव बनाते हैं, जिससे सूर्य की ऊर्जा का बेहतर दोहन हो पाता है। [12-14]

इसके साथ ही, उन्नत पदार्थ विज्ञान ने ऐसे उत्प्रेरकों के विकास को भी गति दी है जो अधिक चयनात्मक, स्थिर और कम लागत वाले हैं। प्रकाश-अवशोषक, आवेश परिवहन माध्यम और उत्प्रेरकों को एक ही एकीकृत प्रणाली में संयोजित करने से इंटरफेस पर होने वाली ऊर्जा हानि कम होती है और समग्र प्रदर्शन में सुधार होता है। ऐसी समन्वित प्रणालियाँ अब प्रयोगशाला स्तर से आगे बढ़कर पायलट और अर्ध-व्यावहारिक स्तर तक पहुँच रही हैं। इस प्रकार, नैनोप्रौद्योगिकी और पदार्थ विज्ञान में हुई प्रगति कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण को एक व्यवहार्य, स्वच्छ और सतत ऊर्जा समाधान के रूप में स्थापित करने की दिशा में महत्वपूर्ण कदम सिद्ध हो रही है।

2.7 चुनौतियाँ और अनुसंधान अंतराल

यद्यपि कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण एक अत्यंत आशाजनक तकनीक के रूप में उभर रही है, फिर भी इसके व्यापक व्यावहारिक अनुप्रयोग के मार्ग में कई गंभीर चुनौतियाँ विद्यमान हैं। कम ऊर्जा रूपांतरण दक्षता इस क्षेत्र की प्रमुख समस्याओं में से एक है, क्योंकि वर्तमान प्रणालियाँ सूर्य की उपलब्ध ऊर्जा का केवल सीमित भाग ही उपयोगी रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित कर पाती हैं। इसके अतिरिक्त, निरंतर प्रकाश और रासायनिक अभिक्रियाओं के संपर्क में रहने से प्रयुक्त पदार्थों का क्षरण होना प्रणाली की दीर्घकालिक स्थिरता को प्रभावित करता है।[15]

उच्च लागत भी एक महत्वपूर्ण बाधा है, विशेषकर तब जब बहुमूल्य धातुओं पर आधारित अर्धचालकों और उत्प्रेरकों का उपयोग किया जाता है। साथ ही, प्रयोगशाला स्तर पर सफल प्रणालियों को बड़े पैमाने पर लागू करना तकनीकी जटिलताओं, सामग्री उपलब्धता और प्रक्रिया नियंत्रण जैसी समस्याओं के कारण कठिन सिद्ध होता है। इन सभी चुनौतियों के समाधान के लिए बहुविषयक, दीर्घकालिक और सहयोगात्मक अनुसंधान की आवश्यकता है, जिसमें नैनोप्रौद्योगिकी, पदार्थ विज्ञान, रसायन विज्ञान और इंजीनियरिंग के समन्वित प्रयास शामिल हों। ऐसे संगठित अनुसंधान प्रयास ही कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण को एक व्यावहारिक और सतत ऊर्जा समाधान के रूप में स्थापित कर सकते हैं। [16]

2.8 पर्यावरणीय और सामाजिक महत्व

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण स्वच्छ और सतत ऊर्जा उत्पादन की दिशा में एक क्रांतिकारी तकनीक के रूप में उभर रहा है, जो जीवाश्म ईंधनों पर बढ़ती वैश्विक निर्भरता को कम करने की क्षमता रखता है। सूर्य की अक्षय ऊर्जा का उपयोग कर जल और कार्बन डाइऑक्साइड जैसे प्रचुर संसाधनों से ईंधन और रसायनों का उत्पादन इस तकनीक को पर्यावरण-अनुकूल बनाता है। चूँकि इस प्रक्रिया में कार्बन डाइऑक्साइड का पुनः उपयोग किया जाता है, इसलिए यह एक कार्बन-न्यूट्रल ऊर्जा चक्र को प्रोत्साहित करती है, जिससे ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन में कमी लाई जा सकती है और जलवायु परिवर्तन के प्रभावों को सीमित किया जा सकता है।[17]

इसके अतिरिक्त, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण भविष्य में विकेंद्रीकृत ऊर्जा उत्पादन की अवधारणा को भी साकार कर सकता है। छोटे-स्तर की, स्थानीय रूप से स्थापित प्रणालियाँ सूर्य के प्रकाश की उपलब्धता के आधार पर सीधे ईंधन या ऊर्जा वाहकों का उत्पादन कर सकती हैं, जिससे केंद्रीकृत ऊर्जा संयंत्रों और लंबी आपूर्ति श्रृंखलाओं पर निर्भरता घटेगी। यह विशेष रूप से दूरदराज़ और विकासशील क्षेत्रों के लिए लाभकारी हो सकता है, जहाँ पारंपरिक ऊर्जा अवसंरचना सीमित है। इस प्रकार, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण न केवल स्वच्छ ऊर्जा संक्रमण को गति देगा, बल्कि ऊर्जा सुरक्षा, आत्मनिर्भरता और पर्यावरण संरक्षण के लक्ष्यों को भी सुदृढ़ करेगा।[18,19]

2.9 भविष्य की संभावनाएँ

नवीन पदार्थों की खोज, उन्नत उपकरण डिज़ाइन और संगणकीय मॉडलिंग में हो रही प्रगति के साथ कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण का भविष्य अत्यंत संभावनापूर्ण दिखाई देता है। नए अर्धचालक, नैनो-संरचित समिश्र पदार्थ और पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में उपलब्ध उत्प्रेरक इस तकनीक की दक्षता, स्थिरता और लागत-प्रभाविता को लगातार बेहतर बना रहे हैं। वहीं, उन्नत उपकरण डिज़ाइन के माध्यम से प्रकाश-अवशोषण, आवेश परिवहन और रासायनिक रूपांतरण को एकीकृत करने वाली प्रणालियाँ विकसित की जा रही हैं, जो ऊर्जा हानि को कम कर समग्र प्रदर्शन को बढ़ाती हैं।

इसके साथ ही, संगणकीय मॉडलिंग और सैद्धांतिक गणनाएँ पदार्थों के गुणों, अभिक्रिया तंत्रों और इंटरफेस प्रक्रियाओं को गहराई से समझने में सहायक सिद्ध हो रही हैं। इससे प्रयोगात्मक अनुसंधान को अधिक लक्षित और कुशल दिशा मिलती है। निरंतर और बहुविषयक अनुसंधान प्रयासों के परिणामस्वरूप कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण भविष्य में नवीकरणीय ऊर्जा प्रणालियों का एक महत्वपूर्ण और पूरक घटक बन सकता है, जो स्वच्छ ऊर्जा उत्पादन, कार्बन प्रबंधन और ऊर्जा सुरक्षा जैसे वैश्विक लक्ष्यों को प्राप्त करने में निर्णायक भूमिका निभाएगा

3. उपसंहार

कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण आधुनिक ऊर्जा संकट और पर्यावरणीय चुनौतियों के समाधान की दिशा में प्रकृति से सीखने का एक अत्यंत प्रभावी और दूरदर्शी प्रयास है। प्राकृतिक प्रकाश संश्लेषण, जिसने पृथ्वी पर जीवन को संभव बनाया, उसी से प्रेरणा लेकर यह तकनीक सूर्य के प्रकाश जैसी अक्षय ऊर्जा को रासायनिक ईंधनों में परिवर्तित करने का लक्ष्य रखती है। इस प्रक्रिया के माध्यम से जल और कार्बन डाइऑक्साइड जैसे प्रचुर और सस्ते संसाधनों का उपयोग कर हाइड्रोजन, मेथनॉल, फॉर्मिक अम्ल तथा अन्य उपयोगी रसायनों का उत्पादन किया जा सकता है, जो स्वच्छ और सतत ऊर्जा भविष्य की नींव बन सकते हैं।

आज की वैश्विक ऊर्जा व्यवस्था मुख्यतः जीवाश्म ईंधनों पर निर्भर है, जिसके कारण कार्बन डाइऑक्साइड उत्सर्जन, जलवायु परिवर्तन और पर्यावरणीय क्षरण जैसी गंभीर समस्याएँ उत्पन्न हो रही हैं। ऐसे परिदृश्य में कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण एक वैकल्पिक और पर्यावरण-अनुकूल मार्ग प्रस्तुत करता है। सूर्य की अक्षय ऊर्जा का उपयोग कर रासायनिक ऊर्जा का भंडारण न केवल ऊर्जा उत्पादन को स्वच्छ बनाता है, बल्कि कार्बन-न्यूट्रल या कार्बन-नकारात्मक ऊर्जा चक्र को भी बढ़ावा देता है। विशेष रूप से कार्बन डाइऑक्साइड के पुनः उपयोग द्वारा यह तकनीक ग्रीनहाउस गैसों की समस्या के समाधान में भी योगदान दे सकती है।

हालाँकि, वर्तमान में कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण का व्यावहारिक उपयोग अभी विकासशील अवस्था में है। कम ऊर्जा रूपांतरण दक्षता, प्रयुक्त पदार्थों का दीर्घकालिक क्षरण, उच्च लागत और बड़े पैमाने पर कार्यान्वयन से जुड़ी तकनीकी जटिलताएँ इसके व्यापक उपयोग में बाधा उत्पन्न करती हैं। इसके बावजूद, नैनोप्रौद्योगिकी, पदार्थ विज्ञान, उत्प्रेरण और संगणकीय मॉडलिंग में हो रही निरंतर प्रगति इन चुनौतियों को धीरे-धीरे कम कर रही है। नवीन अर्धचालक पदार्थ, पृथ्वी पर प्रचुर मात्रा में उपलब्ध उत्प्रेरक और उन्नत उपकरण डिज़ाइन इस तकनीक को अधिक कुशल, स्थिर और किफायती बनाने की दिशा में महत्वपूर्ण भूमिका निभा रहे हैं।

भविष्य के परिप्रेक्ष्य में, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण विकेंद्रीकृत ऊर्जा उत्पादन की अवधारणा को भी साकार कर सकता है। स्थानीय स्तर पर स्थापित प्रणालियाँ सीधे सूर्य प्रकाश से ईंधन या ऊर्जा वाहकों का उत्पादन कर सकती हैं, जिससे दूरदराज़ और ऊर्जा-वंचित क्षेत्रों में ऊर्जा पहुँचाना संभव हो सकेगा। इससे न केवल ऊर्जा सुरक्षा बढ़ेगी, बल्कि आर्थिक और सामाजिक विकास को भी बल मिलेगा।

निष्कर्षतः, कृत्रिम प्रकाश संश्लेषण केवल एक वैज्ञानिक अनुसंधान विषय नहीं, बल्कि भविष्य की स्वच्छ, सतत और सुरक्षित ऊर्जा प्रणाली की एक मजबूत संभावना है। निरंतर, दीर्घकालिक और सहयोगात्मक अनुसंधान के माध्यम से यह तकनीक आने वाले समय में नवीकरणीय ऊर्जा प्रणालियों का एक महत्वपूर्ण हिस्सा बन सकती है और मानव समाज को पर्यावरण-संतुलित ऊर्जा भविष्य की ओर ले जाने में निर्णायक भूमिका निभा सकती है।

4. कृतज्ञता ज्ञापन

लेखक इस शोध कार्य के लिए मदन मोहन मालवीय प्रोद्योगिकी विश्वविद्यालय गोरखपुर द्वारा प्रदान की गई संस्थागत तथा प्रयोगशाला सुविधाओं हेतु हार्दिक धन्यवाद ज्ञापित करते है एवं सहयोग के लिए कृतज्ञ हैं।

संदर्भ ग्रंथ सूची (Bibliography/References)

1. Lewis, N. S.; Nocera, D. G. Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. Proceedings of the National Academy of Sciences 2006, 103, 15729–15735.https://doi.org/10.1073/pnas.0603395103
2. Barber, J. Photosynthetic energy conversion: Natural and artificial. Chemical Society Reviews 2009, 38, 185–196. DOI: https://doi.org/10.1039/B802262N
3. Tachibana, Y.; Vayssieres, L.; Durrant, J. R. Artificial photosynthesis for solar water splitting. Nature Photonics 2012, 6, 511–518. https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.175
4. Nocera, D. G. Solar fuels and artificial photosynthesis. Accounts of Chemical Research 2017, 50, 616–619. DOI: 10.1021/acs.accounts.6b00615
5. Fujishima, A.; Honda, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. Nature 1972, 238, 37–38. DOI: 10.1038/238037a0
6. Yfrach, G. S.; Liddell, P. A.; Hung, S. C.; Moore, A. L.; Gust, D.; Moore, T. A. Artificial photosynthetic reaction centers. Nature 1997, 385, 239–241. 10.1038/385239a0
7. Yfrach, G. S.; Rigaud, J. L.; Durantini, E. N.; Moore, A. L.; Gust, D.; Moore, T. A. Artificial photosynthetic antenna–reaction center complexes. Nature 1998, 392, 479–482. DOI: 10.1016/j.crci.2016.05.016
8. Listorti, A.; Durrant, J.; Barber, J. Artificial photosynthesis: Challenges and perspectives. Nature Materials 2009, 8, 929–930. DOI: 10.1038/nmat2578
9. Roy, S. C.; Varghese, O. K.; Paulose, M.; Grimes, C. A. Toward solar fuels: Photocatalytic conversion of CO_2 and water. ACS Nano 2010, 4, 1259–1278. doi:10.1021/nn9015423
10. Gust, D.; Moore, T. A.; Moore, A. L. Solar fuels via artificial photosynthesis. Faraday Discussions 2012, 155, 9–26. DOI https://doi.org/10.1039/C1FD00110H
11. Park, C. B.; Lee, S. H.; Subramanian, E.; Kale, B. B.; Lee, S. M.; Baeg, J. O. Photocatalyst–enzyme coupled systems for solar chemical synthesis. Chemical Communications 2008, 5423–5425. https://doi.org/10.1039/B808256A
12. Diwald, O.; Thompson, T. L.; Zubkov, T.; Goralski, E. G.; Walck, S. D.; Yates, J. T. Photochemical activity of metal oxide surfaces. The Journal of Physical Chemistry B 2004, 108, 6004–6008. https://doi.org/10.1021/jp031267y
13. Li, D.; Kaner, R. B. Graphene-based materials. Science 2008, 320, 1170–1171. DOI: 10.1126/science.1158180
14. Dikin, D. A.; Stankovich, S.; Zimney, E. J.; Piner, R. D.; Dommett, G. H. G.; Evmenenko, G.; Nguyen, S. T.; Ruoff, R. S. Preparation and characterization of graphene oxide paper. Nature 2007, 448, 457–460. DOI: 10.1038/nature06016
15. Chen, H.; Müller, M. B.; Gilmore, K. J.; Wallace, G. G.; Li, D. Mechanically strong graphene-based composites. Advanced Materials 2008, 20, 3557–3561. DOI: 10.1002/adma.200800757
16. Geim, A. K.; Novoselov, K. S. The rise of graphene. Nature Materials 2007, 6, 183–191. https://doi.org/10.1038/nmat1849
17. Zhang, H.; Lv, X.; Li, Y.; Wang, Y.; Li, J. P25–graphene composite as a high-performance photocatalyst. ACS Nano 2010, 4, 380–386. DOI: 10.1021/nn901221k
18. Williams, G.; Seger, B.; Kamat, P. V. TiO_2–graphene nanocomposites for photocatalysis. ACS Nano 2008, 2, 1487–1491. http://dx.doi.org/10.1021/nn800251f
19. Xiang, Q.; Yu, J.; Jaroniec, M. Graphene-based semiconductor photocatalysts. Chemical Society Reviews 2012, 41, 782–796. DOI https://doi.org/10.1039/C1CS15172J